

EME антенна на 77 ГГц

С.Жутяев, RW3BP

Москва, окт. 2014

Мысли о новом 4мм диапазоне начали приходить в голову давно, еще до проведения первых EME (Earth-Moon-Earth) связей на 47 ГГц. Уже тогда было ясно, что 77 ГГц, это самый высокочастотный из имеющихся диапазонов, на котором еще есть шанс провести EME QSO. Следующие диапазоны 122 ГГц и 134 ГГц пока не пригодны для EME и вряд ли будут пригодны в обозримом будущем. Причина в слишком высоких потерях, для компенсации которых необходим нереально мощный передатчик.

Итак, EME на 4мм диапазоне. Здесь все сложно, за что ни возьмись. Однако, пока поговорим об антенне.

У меня уже имелась антенна, которая неплохо себя показала на 47 ГГц. По предварительным прикидкам ее размера должно было хватить и на 77 ГГц при условии, что эффективность зеркала не слишком сильно упадет. Это офсетная параболическая антенна фирмы "Супрал" диаметром 2.4м. Антенна отштампована из дюралевого листа, толщиной около 2.5мм. Хорошую жесткость антенне придает коробчатый "усилитель" добавленный по краю зеркала. Оставалось надеяться, что профиль антенны выдержан достаточно точно. Хотя надежды были не очень велики, учитывая требования к точности зеркала на 77 ГГц. Стандартное условие, это отклонение от идеальной формы не больше одной шестнадцатой длины волны (соответствует фазовой ошибке в плоскости апертуры 45 градусов). Это всего 0.24мм или 240 микрон. Надежду давала неплохая работа антенны на 47 ГГц. Впрочем, на 47 ГГц я использовал антенну "как есть" и даже не имел возможность проверить ее диаграмму направленности. Было ясно, что на 77ГГц такой простой вариант не пройдет.

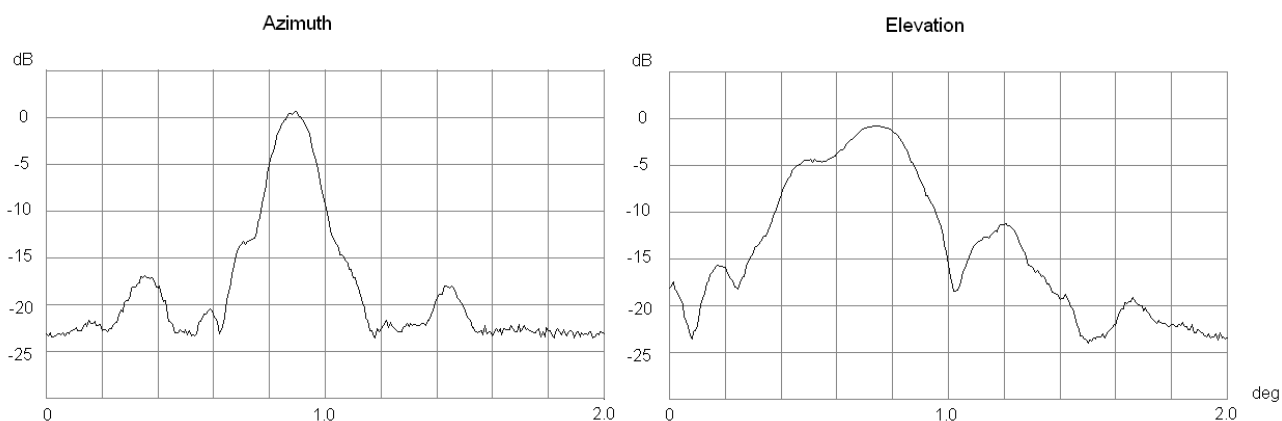
На фотографии показана антенна. Видно, что для снижения возможных деформаций зеркала антенный блок крепится на отдельной несущей штанге, не имеющей с краями зеркала механических контактов.



Первые пробы я сделал в октябре 2006 года. Это были самые предварительные попытки измерить шум Солнца. В тот момент я не имел никакого представления о диаграмме направленности антенны. Дальнейшее продвижение данного проекта застопорилось из-за отсутствия возможности изготовить передатчик достаточной мощности и я на несколько лет переключился на диапазон 23см. Возвратился я на 4мм диапазон в 2010 году, когда удалось установить измерительный маяк на балконе 22 этажа, в здании, которое находится в 900 метрах от меня. Это позволило приступить к более тщательному исследованию возможностей антенны. Расстояние 900м несколько меньше необходимого для того, чтобы считать сферическую волну от маяка плоской (при данной длине волны и диаметре антенны). Однако перестройка антенны с 900 м на “бесконечность” легко достигается сдвигом облучателя всего на 0.8мм. Маяк изготовил Владимир RA3ACE на базе самодельного ОСХО и цепочки умножителей до 19350МГц. Выходная мощность

около 15мВт. Мне оставалось добавить диодный учетверитель и рупорную антенну, диаметром 30мм (усиление около 25 dBi).

Уже первые измерения показали, что диаграмма направленности далека от совершенства, особенно в угломестной плоскости.



Первая мысль была о том, что я ошибся с определением точки фокуса зеркала. Еще и еще раз проверил и убедился, что точка соответствует документации на антенну. Перемещение облучателя по всем трем координатам заметного улучшения не дали. После этого начал искать возможные пути решения проблемы.

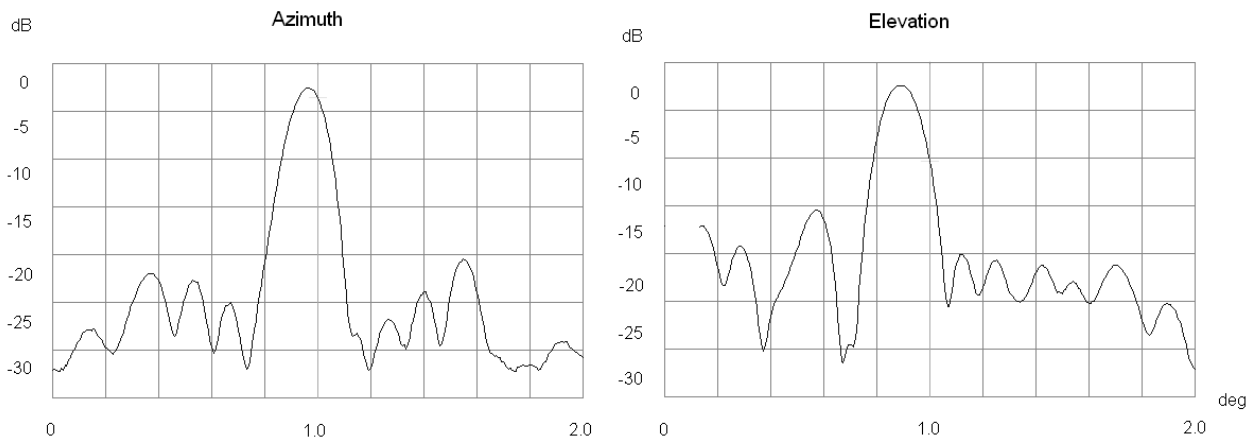
В какой-то момент появилась мысль попробовать корректирующую линзу из диэлектрика. Первые простые эксперименты показали, что идея работает. Кусок пластика, помещенный между облучателем и зеркалом, давал заметную прибавку уровня сигнала от маяка. Надо было только найти место, в которое этот пластик поместить.

Следующим этапом между облучателем и зеркалом закрепил столик из пенопласта и убедился, что сам столик на уровень сигнала не влияет. Столик расположен так, что если смотреть из точки фокуса то антенна проецируется на него в виде круга, диаметром 25см. Начал с попытки коррекции диаграммы направленности в одной (угломестной) плоскости. В качестве линзы использовал полосы листового

диэлектрика, расположенные горизонтально.



Путем подбора ширины, толщины и местоположения полос удалось существенно улучшить диаграмму направленности. По крайней мере, появился нормальный главный лепесток и, примерно на 3дБ, выросло усиление.

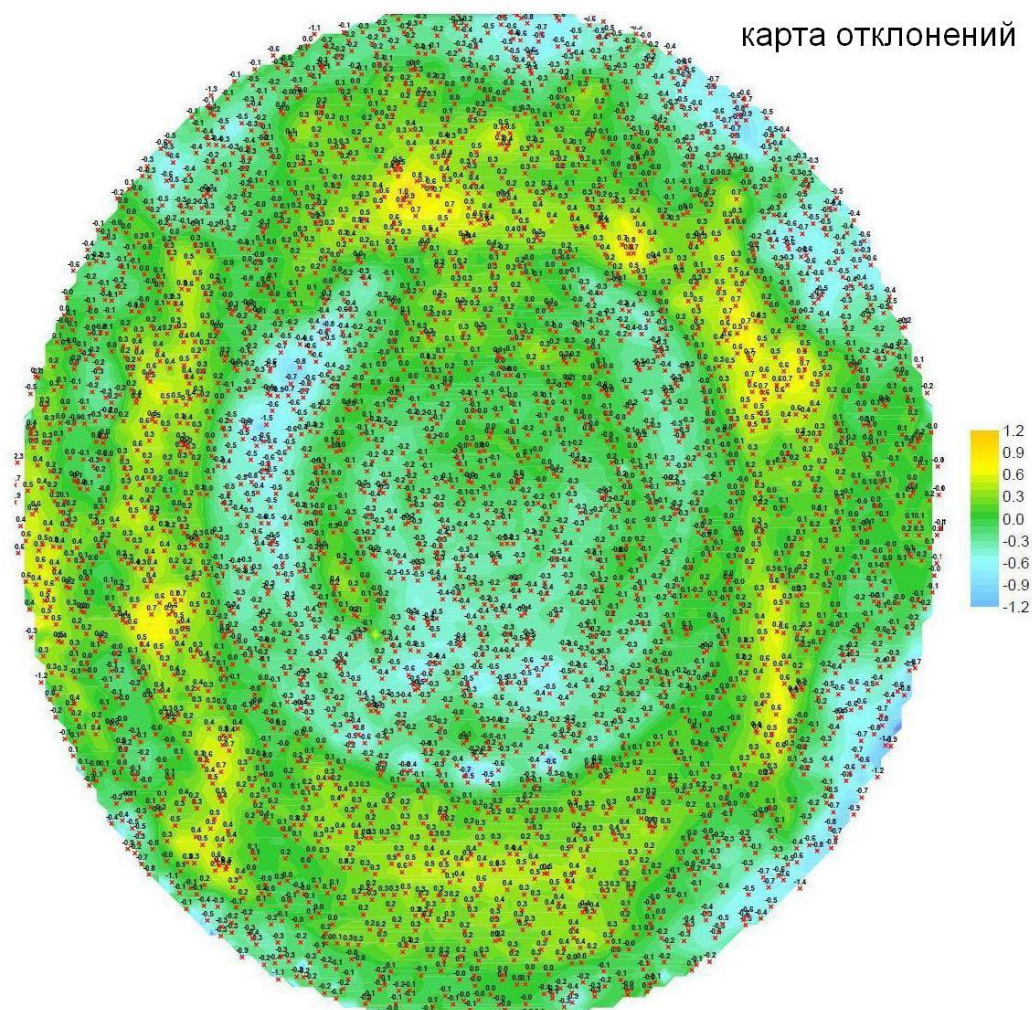


Однако стало ясно, что подобрать правильную линзу методом проб и ошибок чрезвычайно трудно. Особенно, если корректировать диаграмму направленности в

двух плоскостях одновременно. Поэтому следующая мысль была определить истинную форму зеркала путем 3D сканирования, получить карту отклонений этой формы от идеального параболоида и на основании этой карты рассчитать корректирующую диэлектрическую линзу.

В сентябре 2011 года удалось договориться о сканировании с помощью лазерного сканера, обеспечивающего в моем случае точность около 0.1мм. Буквально за несколько минут было сделано сканирование при трех углах места антенны: 0, 30 и 50 градусов. Порадовало то, что после обработки все три результата совпали. Это говорит о том, что измерения правильные и не зависят от угла падения луча лазера на поверхность зеркала. Плюс к этому стало ясно, что зеркало имеет хорошую жесткость, и сила тяжести мало влияет на его геометрию.

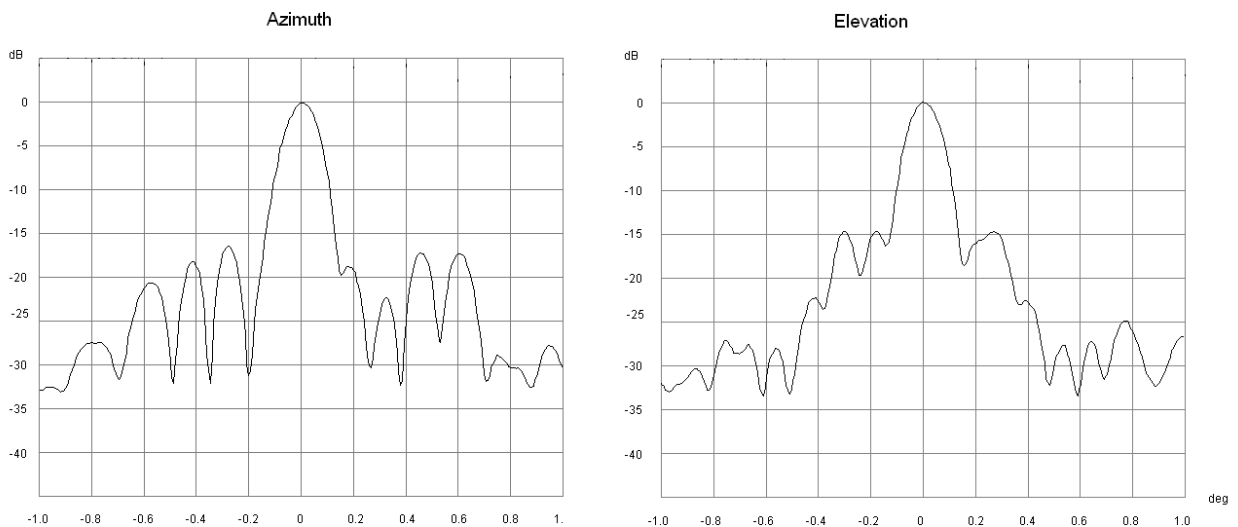
По результатам измерений был найден параболоид, наиболее близкий к реальной поверхности антенны и, соответственно, новое положение точки фокуса.



Здесь показана карта отклонений поверхности антенны от нового оптимального параболоида. Кстати хорошо видна деформация зеркала подзеркальником. Что это, кривой подзеркальник или следствие ударных ветровых нагрузок, сказать трудно.

Оказалось, что облучатель надо сдвинуть в новую точку фокуса на 11мм в сторону зеркала и на на 32мм вниз!!! Стало ясно, почему я не смог вручную найти новое положение облучателя. Я просто не мог подумать, что надо двигать его так далеко.

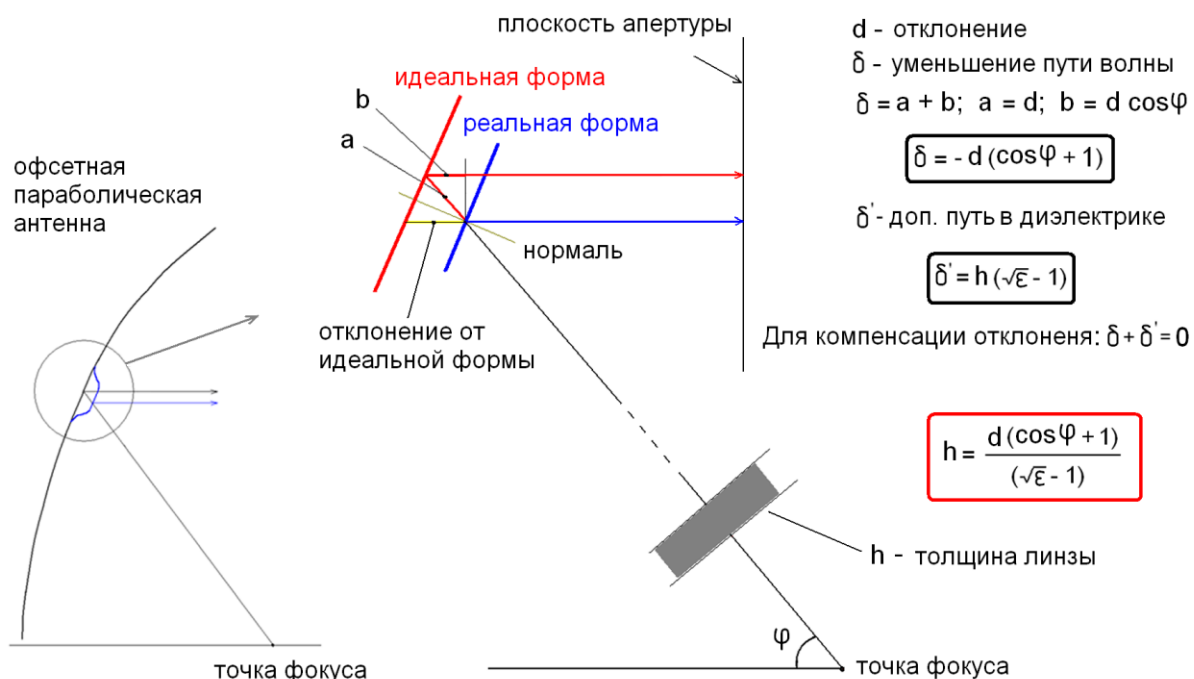
После перемещения облучателя в нужную точку диаграмма направленности значительно улучшилась даже без корректирующей линзы.



Тем не менее, вариант с линзой тоже надо было проверить. Принцип работы и метод расчета диэлектрической линзы проиллюстрирован на рисунке ниже. Там показано сечение офсетного параболического зеркала и обозначена плоскость, перпендикулярная оси излучения антенны (оси исходного параболоида). Это плоскость апертуры. Свойство параболоида таково, что волна, падающая из точки фокуса в любую точку зеркала, отражается параллельно оси параболоида. Причем путь, который проходит волна от точки фокуса до плоскости апертуры один и тот же для любой точки зеркала, что обеспечивает синфазность в плоскости апертуры. Все это справедливо для идеально точной поверхности зеркала. Реальное зеркало имеет отклонения от идеальной формы.

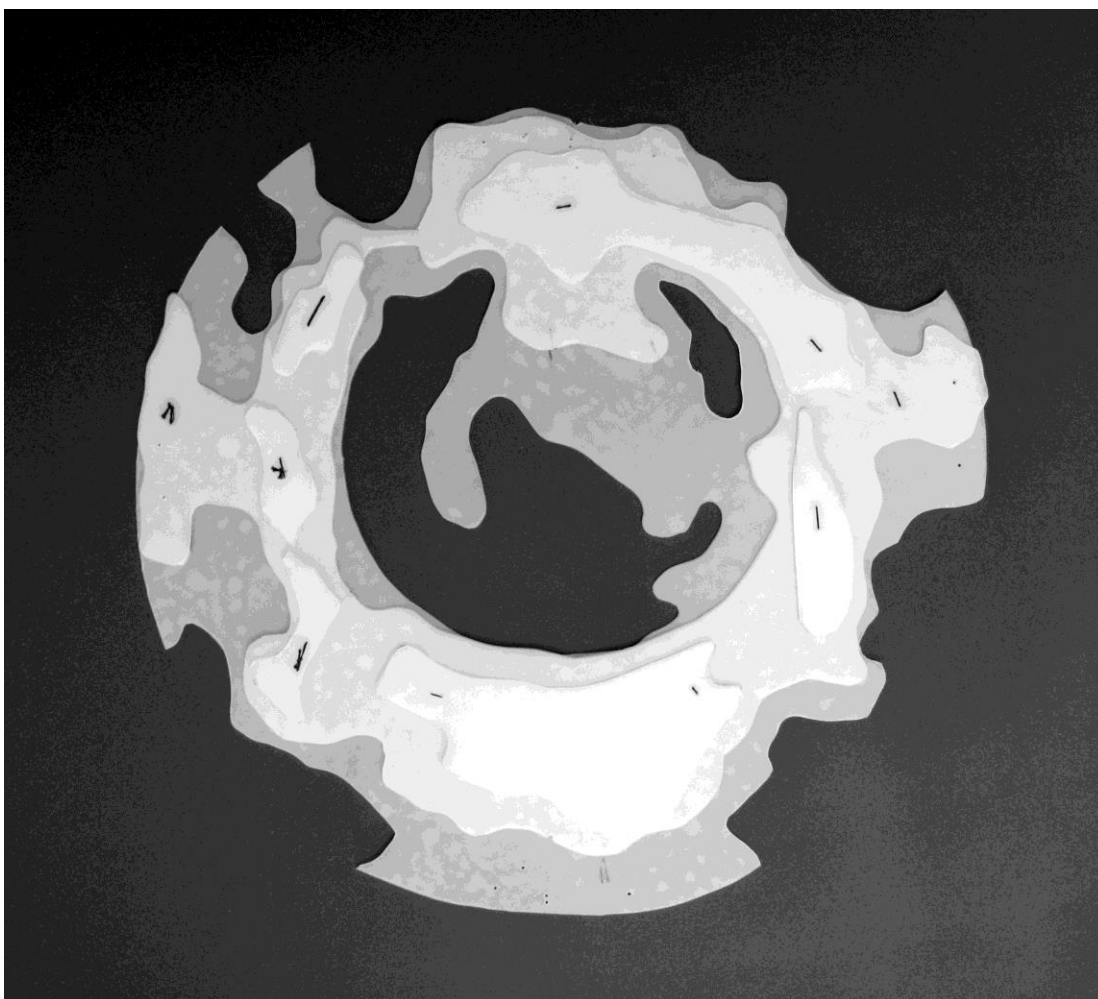
Рассмотрим некоторый небольшой участок поверхности реального зеркала. Пусть он немного смещен в направлении излучения антенны. При этом путь от фокуса до

плоскости апертуры сократится. Волна достигнет этой плоскости раньше времени. Для компенсации на пути волны можно добавить диэлектрик, который выполняет в данном случае функцию линии задержки. Путем несложного вычисления можно найти толщину диэлектрика.



Результатом сканирования зеркала является так называемое облако точек, где каждая точка это одно измерение. Можно посчитать толщину диэлектрика для каждой точки зеркала, а затем перенести этот результат в плоскость линзы.

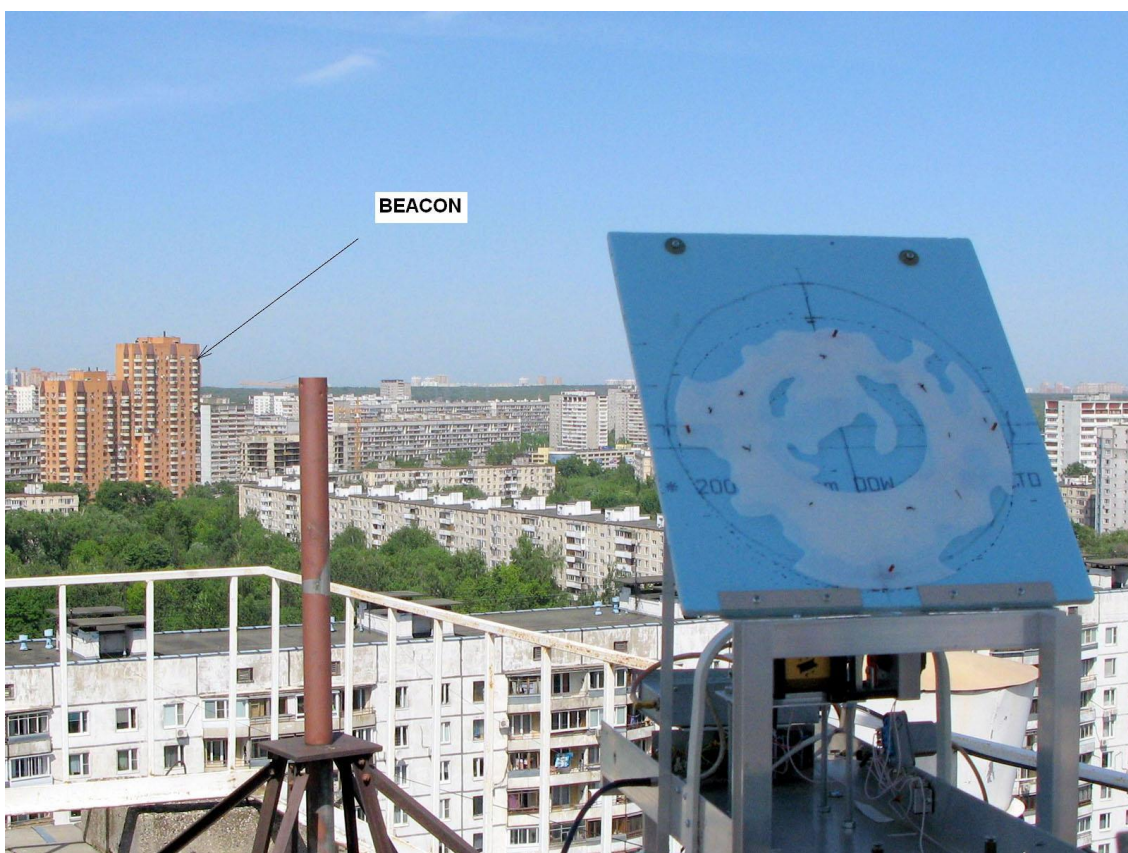
Я не стал связываться с фрезеровкой, а сделал линзу из трех слоев 1 мм листового фторопласта.



Линза дала заметный положительный результат. Примерно на 7 дБ снизился уровень первых боковых лепестков. К сожалению заметного повышения коэффициента усиления антенны линза не обеспечила, и я временно отказался от ее применения. Тем более что полученные параметры меня уже устраивали.

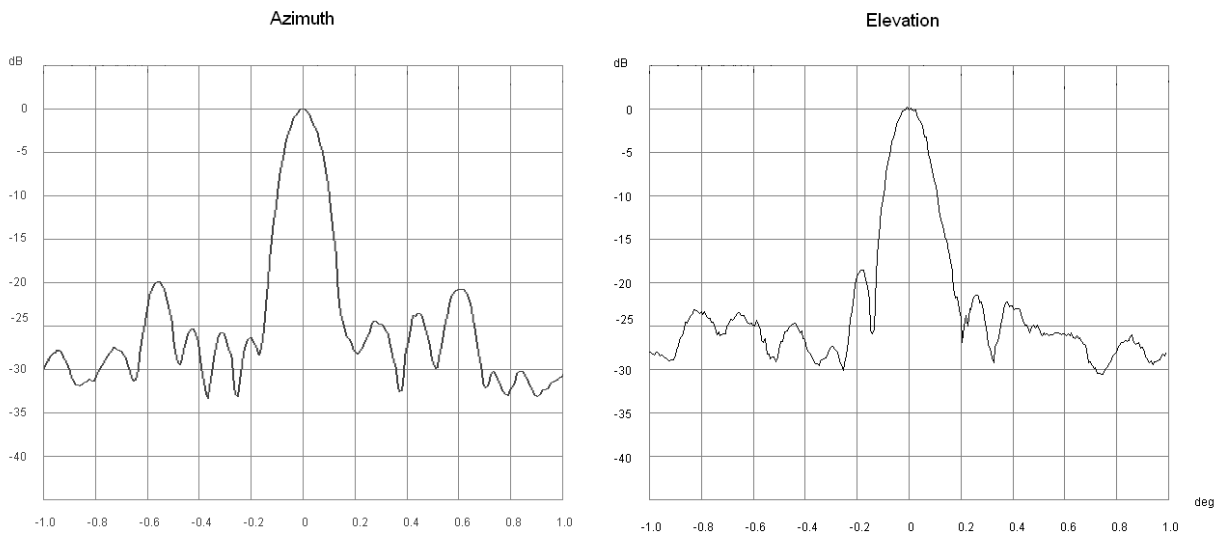
К тому же мне повезло стать обладателем ЛБВ, которая в принципе могла работать на 77ГГц. Могла, но, к сожалению не работала. Мне потребовалось больше года, чтобы получить мощность 60Вт, достаточную для первых EME экспериментов. В результате в феврале 2013 мне удалось принять первое эхо от Луны, а летом Ал W5LUA также сумел принять мои сигналы.

Вернемся к антенне. При подготовке этой статьи я решил еще раз проверить работу антенны с корректирующей линзой.



На фотографии хорошо виден облучатель, точная масштабированная копия двухмодового рупора, который я использовал на диапазоне 23 см. Результаты,

полученные в конце 2011 года, подтвердились.



При заметном улучшении диаграммы направленности рост усиления составил около 0.4 дБ. В тот момент трудно было сказать много это или мало. Для оценки эффективности линзы нужно знать размер проблемы, т.е. знать, насколько моя неидеальная антенна уступает идеальной.

Результаты сканирования антенны позволили вычислить среднеквадратичное отклонение (СКО) профиля зеркала от оптимального параболоида. Оно равно 0.31мм. Известна формула Ruze, которая позволяет оценить потери усиления антенны для известного СКО.

$$L_R = -685 \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^2 (dB); \quad \varepsilon - \text{среднеквадратичное отклонение}$$

Для моего случая $L = -685 (0.31/3.9)^2 = -4.3 \text{ dB}$. Это 2.7 раза.

Если результат верный, то потери большие и выигрыш от линзы 0.4 дБ положение не спасает. К счастью дальнейшая практика показала, что реальные потери не столь велики. Формула Ruze показывает скорее верхнюю границу потерь для наихудшего характера неровностей зеркала. В случае плавно изменяющихся отклонений, как в моем случае, формула дает завышенный результат. К тому же известен корректирующий коэффициент для данной формулы, который зависит от глубины зеркала. Это, кстати, видно из формулы для расчета толщины диэлектрической линзы, которая была показана выше. Там видно, что влияние неровностей зависит от косинуса угла "фи". Чем больше угол, тем меньше влияние. Но большие углы как раз

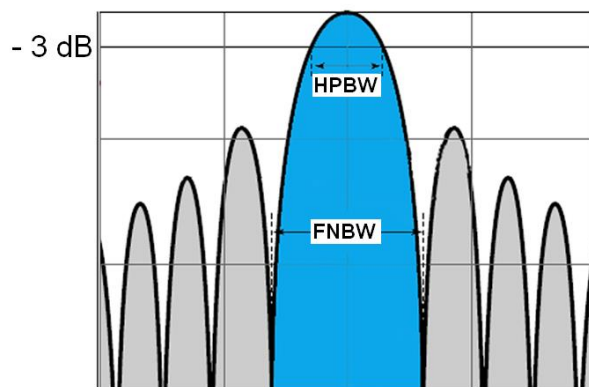
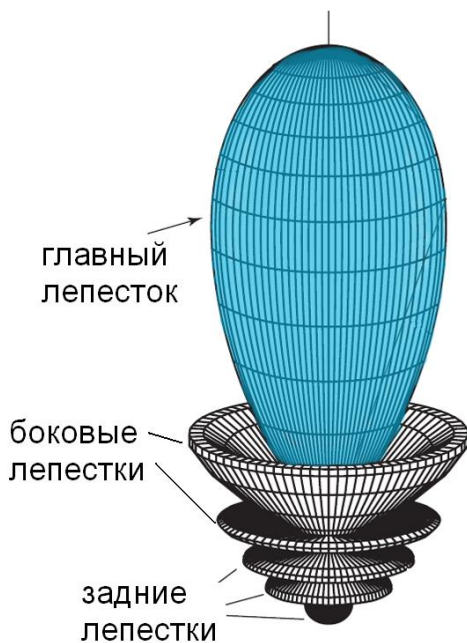
характерны для глубоких зеркал. Так для осесимметричного зеркала с $F/D = 0.25$ край зеркала виден из точки фокуса под углом 90 градусов, где косинус равен нулю. Важно то, что офсетная антенна это вырубка как раз из глубокого зеркала. Так для моей антенны исходный параболоид имеет $F/D = 0.27$. Полезно также то, что облучатель офсетной антенны имеет наклон к оси излучения (в моем случае около 50 град). А косинус 50 градусов это уже хорошо.

Для того, чтобы разобраться в этом вопросе надо было искать новые, независимые способы оценки снижения усиления моей антенны из-за неровностей зеркала.

Два таких способа, которые я попробовал реализовать связаны с таким понятием, как эффективность главного луча антенны (main beam efficiency). Этот параметр применяется в основном в радиоастрономии. Рассмотрим антенну в режиме передачи. Вся мощность, излучаемую антенной, можно разбить на две части. Это мощность, излучаемая в пределах главного лепестка диаграммы направленности и мощность, излучаемая всеми остальными боковыми и задними лепестками. Так вот, доля, излучаемая главным лепестком, это и есть эффективность главного луча (лепестка). Суммарная доля прочих лепестков называется коэффициентом рассеяния.

Эффективность главного лепестка ϵ_M

$$\epsilon_M = \frac{\int_{\Omega} P_n(\theta, \phi) d\Omega}{\int_{4\pi} P_n(\theta, \phi) d\Omega}$$



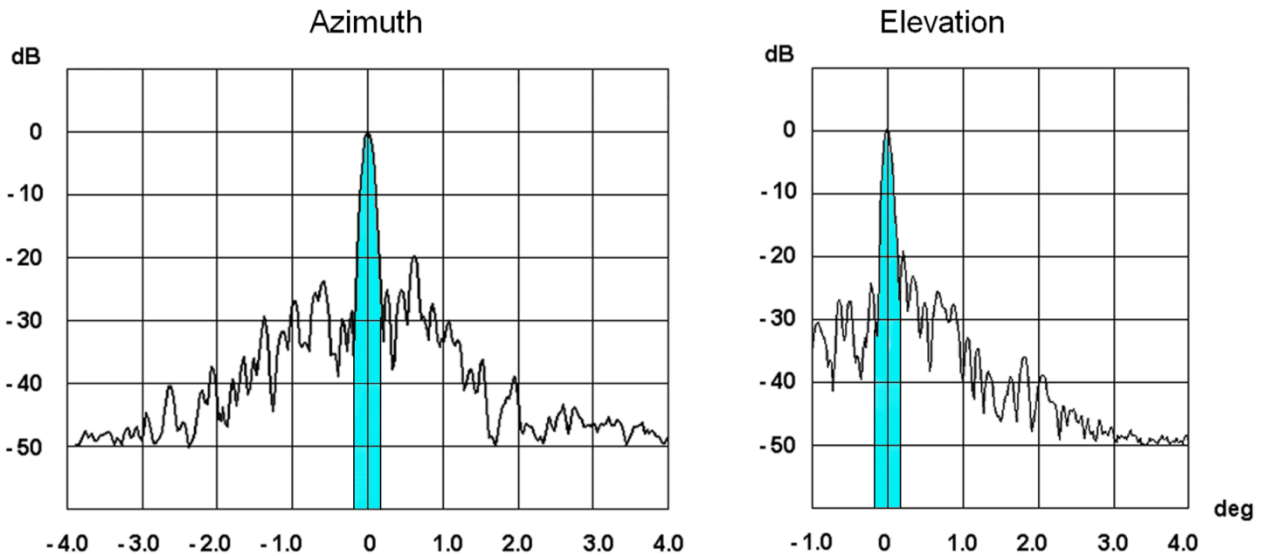
В зеркальной антенне эффективность главного луча зависит в значительной степени от диаграммы направленности облучателя. Чем уже главный лепесток облучателя, тем меньшая часть зеркала облучается. При этом уровень боковых и задних лепестков уменьшается, и эффективность главного луча ϵ_M растет. Правда растет за счет снижения коэффициента использования поверхности зеркала (КИП) и, соответственно, за счет снижения усиления антенны. Важно, что при определенных параметрах облучателя по известному КИП можно найти ϵ_M и наоборот. Так для моей антенны КИП = 0,8 ϵ_M . Это позволяет выразить коэффициент усиления антенны через эффективность главного луча.

$$G_A = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \text{ КИП } \eta; \quad \text{КИП} = k * \epsilon_M; \quad G_A = \pi^2 \left(\frac{D}{\lambda}\right)^2 k \epsilon_M \eta;$$

$$k = 0,8; \quad G_A \approx 8 \left(\frac{2400}{3.88}\right)^2 \epsilon_M; \quad G_A \approx 3\,060\,000 * \epsilon_M$$

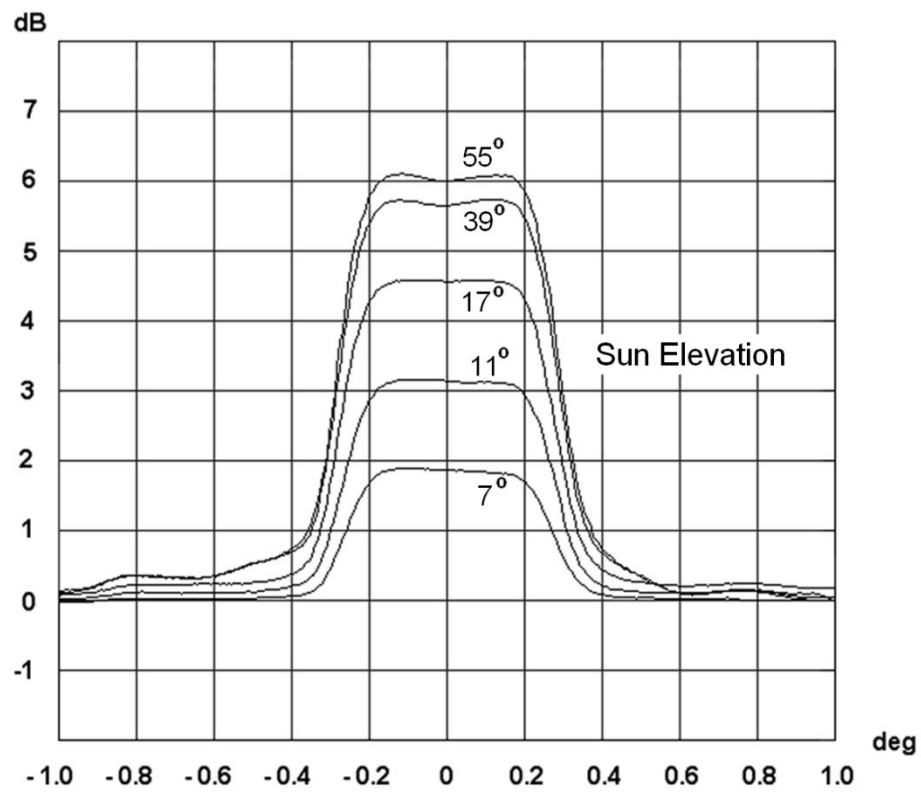
Расчеты показывают, что если бы моя антенна имела идеальную форму зеркала, то эффективность главного луча была бы равна 0,87 и усиление было бы равно 2660000 или 64.5 дБи. Однако отклонения от идеальной формы зеркала приводят к росту уровня боковых лепестков и снижению эффективности главного луча и, соответственно, к снижению коэффициента усиления.

Первая попытка оценить реальное снижение усиления антенны была сделана путем анализа диаграммы направленности. Для этого специально снял диаграмму направленности с максимально возможным динамическим диапазоном 50 дБ. Динамический диапазон ограничен мощностью маяка и уровнем шумов приемника при минимальной полосе пропускания. На рисунке показана диаграмма для варианта с корректирующей линзой. Видно, что углы ограничены диапазоном +/- 4 градуса. Дальнейшее расширение диапазона углов бессмысленно, т.к. там боковые лепестки находятся ниже уровня шума.



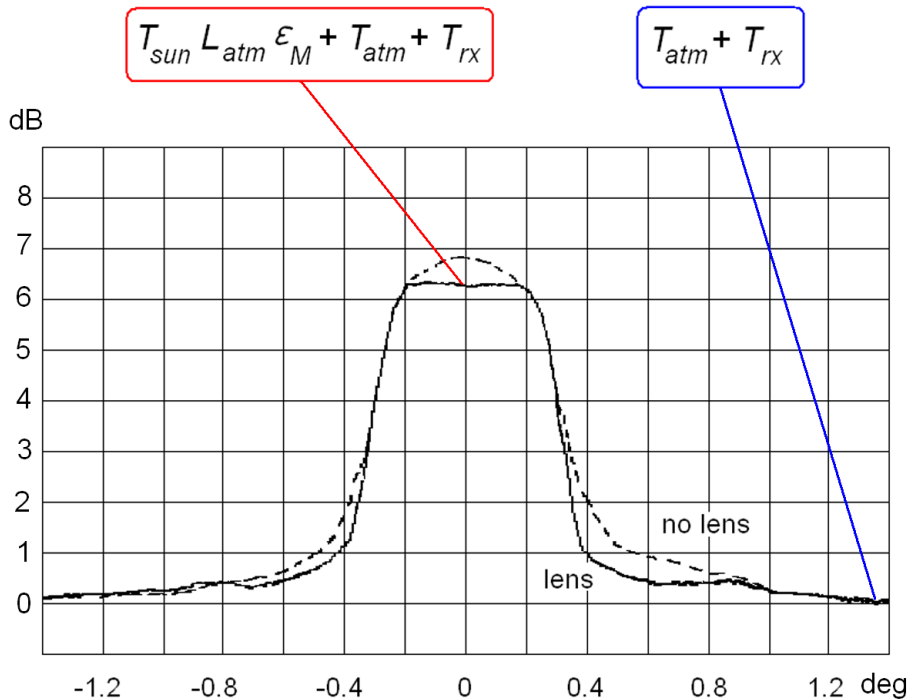
Конечно, для получения точного результата надо иметь полную диаграмму направленности, но это технически неосуществимо. Впрочем при некоторых допущениях может хватить и того что есть. Допущение первое – плавные отклонения поверхности зеркала от идеальной формы приводят к росту боковых лепестков именно в этой узкой зоне углов. Отсюда следует второе допущение – доля удаленных боковых и задних лепестков мало зависит от плавных и небольших отклонений и может быть оценена по расчетной диаграмме направленности. Это значит, что общий интеграл можно заменить на интеграл по зоне диаметром восемь градусов с добавкой около 5%. Исходя из этого путем интегрирования были получены следующие результаты. Эффективность главного луча при наличии корректирующей диэлектрической линзы равна 0,66 . Без линзы 0,60 . Разница составляет 0.4 дБ, что совпадает с результатами измерений уровней сигнала от маяка. Если учесть, что расчетное значение эффективности главного луча равно 0,87, то имеем для случая с линзой снижение эффективности главного луча (и усиления антенны) на 30% или на 1.2 дБ. Эта цифра намного приятней, чем 4.3 дБ по формуле Ruze.

Перейдем теперь к измерению шума Солнца и к информации, которую можно из этого извлечь. На рисунке показаны результаты измерения для различных углов места Солнца над горизонтом.



Измерения проведены при наличии корректирующей линзы. Ширина главного лепестка в 4.5 раза меньше углового размера Солнца, что позволяет видеть солнечный диск и его края. Семейство графиков позволяет оценить зависимость потерь в атмосфере от угла места антенны.

Далее показаны графики, снятые в большем диапазоне углов. Это позволяет видеть «хвосты», связанные с наличием боковых лепестков.



Измерения сделаны с линзой и без линзы. Интересно то, что при меньшем усилении антенны максимальный уровень шума для варианта без линзы выше. Это связано с тем, что в тот момент, когда главный лепесток наведен на центр солнечного диска, плохо подавленные первые боковые лепестки попадают на его края и дают дополнительную прибавку. Это пример того, как измерения шума Солнца могут дать ошибочный результат.

Сделаем теперь еще одну попытку оценить значение эффективности главного луча. Будем исходить из следующих соображений:

- Если при измерениях с линзой навести антенну на центр Солнца, то можно считать, что на диск попадает только главный лепесток. Вклад боковых лепестков при этом не превышает 2%;
- Известно, что на волне 4мм шумовая температура Солнца составляет 7250 К и мало зависит от его активности;
- Кажущаяся температура Солнца снижается пропорционально потерям в атмосфере. Для расчета потерь L_{atm} можно воспользоваться программой «Atmosphere by VK3UM»;

- Кажущаяся температура Солнца пропорциональна эффективности главного луча антенны ε_M . Ведь на Солнце направлен только главный лепесток. Остальные лепестки направлены в основном на холодное небо;

- шум неба определяется в основном шумом атмосферы. Для расчета шумовой температуры неба T_{atm} можно воспользоваться программой «Atmosphere by VK3UM»;

Напишем уравнение

$$Y_{sun} = \frac{T_{sun} L_{atm} \varepsilon_M + T_{atm} + T_{rx}}{T_{atm} + T_{rx}}$$

Здесь числитель, это уровень шума, когда наводим антенну на центр Солнца. Знаменатель, это уровень шума, когда наводим антенну на соседний участок холодного неба. Y_{sun} - это отношение этих уровней, которое мы измеряем.

T_{rx} – шумовая температура приемника. По предварительно сделанным измерениям, $T_{rx} = 1030\text{K}$.

Нам надо найти значение ε_M , поэтому преобразуем уравнение:

$$\varepsilon_M = \frac{(T_{atm} + T_{rx})(Y_{sun} - 1)}{T_{sun} L_{atm}}$$

Имеем следующие исходные данные:

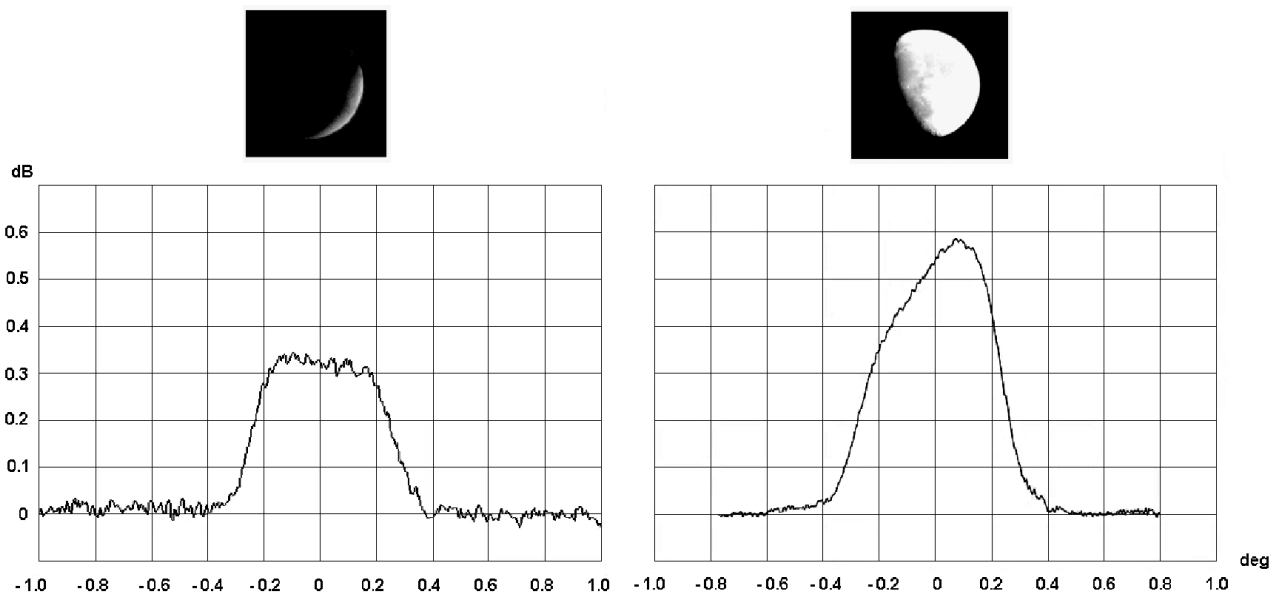
$T_{atm} = 70\text{K}$ и $L_{atm} = 0.77$ для температуры 27C и влажности 38% (высота Солнца над горизонтом 55 градусов).

$T_{rx} = 1030\text{K}$, $T_{sun} = 7250\text{K}$, $Y_{sun} = 4.3$ (6.3dB).

Подставляем эти данные в форму и получаем $\varepsilon_M = 0.65$.

Значение очень близкое к результату, полученному путем интегрирования диаграммы направленности.

Перейдем теперь к измерению шума Луны.



На рисунках приведены графики и фотографии Луны, соответствующие этим графикам. Видно, что шум Луны на 77 ГГц сильно зависит от фазы Луны и от участка поверхности, на который наведена антенна. Уровень шума Луны в полнолуние примерно в два раза выше, чем в новолуние. Поэтому Луна не очень удобна для оценки качества приемной системы. Мало назвать значение шума Луны, надо привести еще целый ряд дополнительных сведений. Тем не менее, этот шум очень важен для проверки точности системы автосопровождения. При этом, в отличие от более низкочастотных диапазонов, нельзя искать центр Луны по максимуму шума, а надо аккуратно искать края лунного диска.

Теперь об измерении шума Юпитера.

Измерение теплового шума Юпитера на 77 ГГц, это сама по себе интересная техническая задача. Конечно, это не значит, что я решил заняться радиоастрономией на миллиметровых волнах. Идея была конкретная и практическая, использовать Юпитер для общей проверки приемной системы и определения ее качества G / T . Для такой проверки нужен точечный источник известной интенсивности.

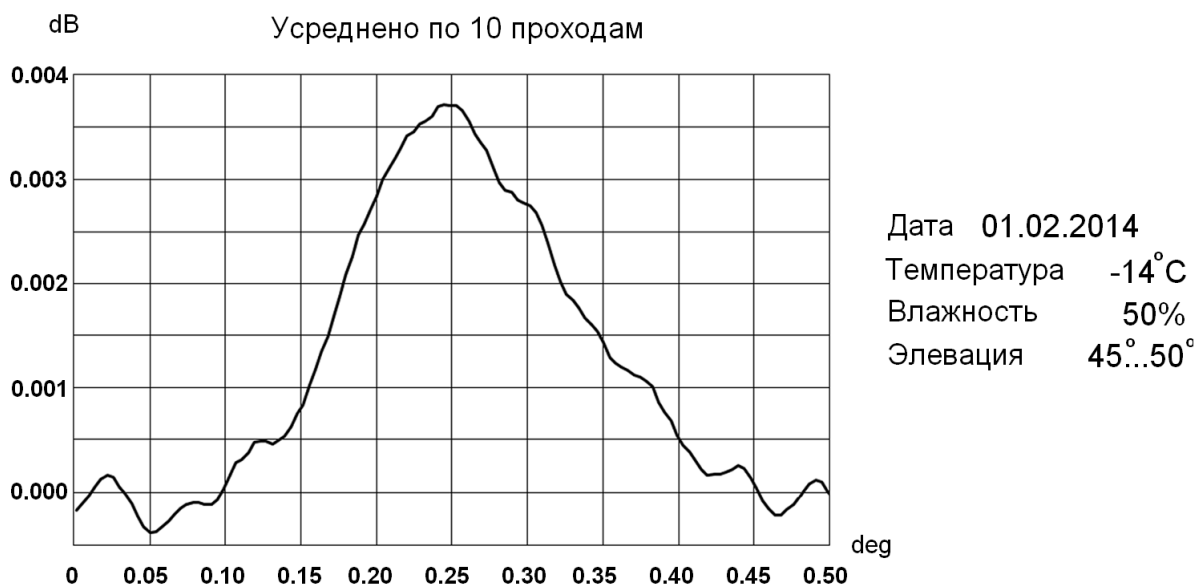
Механическая точность наведения моей антенны недостаточна, чтобы наводить ее вслепую по координатам. Приходится периодически калиброваться по видеокамере с телеобъективом. Поэтому нужен источник, хорошо видимый в оптическом диапазоне. По этим критериям больше всего подходит Юпитер. К тому же он поднимается у меня высоко над горизонтом, что важно для снижения потерь в атмосфере.

Следующим этапом надо было сделать хотя бы оценочный расчет ожидаемого уровня сигнала. Проще всего опереться на имеющиеся результаты измерения шума Луны. Задачу облегчает то, что шумовая температура неосвещенной Луны (новолуние) и шумовая температура Юпитера примерно одинаковы и равны 140 – 150К. В новолуние я принимаю шум Луны с уровнем 0.33 дБ притом, что она полностью перекрывает главный лепесток антенны. Угловой размер Юпитера примерно в 9 раз меньше ширины главного лепестка. Соответственно разница по площади составляет 80 раз и шумовой сигнал от Юпитера должен быть в 80 раз меньше, чем от Луны. Это значит, что сигнал будет иметь уровень 0.004 дБ. При всей своей простоте данная оценка достаточно точна и позволяет определить необходимые технические средства. Ясно, что здесь нужен широкополосный радиометр. Анализатора спектра с полосой 1 МГц явно недостаточно. Как раз в этот момент появилась информация от Луиса СТ1DMK о его новом радиометре. Я не стал делать что-то свое, а приобрел у Луиса радиометр с полосой 40 МГц. Измерения делал в ясные морозные ночи при максимальной прозрачности атмосферы для миллиметровых волн. Даже в таких хороших условиях задача оказалась очень непростой.

В процессе измерений антенна оставалась неподвижной и Юпитер пересекал главный лепесток за счет вращения Земли. На экран монитора моей видеокамеры я прикрепил прозрачный шаблон с траекторией движения Юпитера, а также начальной и конечной точками на этой траектории, отстоящими от центра главного лепестка на 0.25 градуса. Таких траекторий на шаблоне было пять. Одна центральная и по две с каждой стороны через 0.05 градуса. Это связано с тем, что точное положение центра главного лепестка на экране монитора было неизвестно, т.к. мой маяк в это время не работал.

Итак, я ставил поворотом антенны яркую точку Юпитера в начальную точку и включал радиометр. В момент, когда Юпитер достигал конечной точки траектории, радиометр выключал. Один проход занимал чуть менее 2 минут. Стало ясно, что за один проход сигнал Юпитера не виден. Начал накапливать материал для дальнейшего усреднения. К сожалению даже усреднение 10 – 15 проходов не давало надежный результат. Я уже стал терять надежду, тем более, что погода начала портиться. Вдруг 1 февраля сигнал проявился, причем достаточно хорошо и с амплитудой близкой к расчетной. Я сделал несколько серий измерений и убедился,

что результат воспроизводится.



У меня нет этому надежного объяснения. Похоже, многое зависит от состояния атмосферы. Первого февраля температура повысилась и состояние атмосферы явно изменилось по сравнению с предыдущими морозными ночами. Возможно, атмосфера стала более спокойной, что резко снизило флуктуации сигнала. В любом случае я планирую следующей зимой вернуться к эксперименту и постараюсь детальнее разобраться в вопросе.

Выводы:

- 1 – Диапазон 77 ГГц предъявляет исключительно высокие требования к точности поверхности параболического зеркала, притом, что размер антенны для EME связи должен быть не менее 2.4м (возможно 1.8м).
- 2 – Антенны такого качества малодоступны для любительской связи и очень дороги. Возможно использование менее качественных антенн, но с обязательным контролем диаграммы направленности.
- 3 – Возможна компенсация неровностей зеркала за счет корректирующей диэлектрической линзы.
- 4 – Из космических источников сигнала для проверки антенны на данном диапазоне наиболее информативным и удобным является Солнце.

5 – Возможность использования теплового шума Юпитера для контроля приемной системы требует дополнительной проверки.

В заключение две ссылки на видео, которое я сделал в 2013 году.
Первое эхо от Луны в диапазоне 77.5 ГГц. RW3BP, февраль 2013г.

Часть 1 <http://www.youtube.com/watch?v=ctWG2ZXm0Fg>

Часть 2 <http://www.youtube.com/watch?v=XoBB9AV7pWQ>